

*Виброакустика, механіка, опори електричних машин: Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та электромех. Т.37. М., 1971. 3. Справочник проектировщика. Защита от шума / Под ред. Е.Я.Юдина. М., 1974. 4. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Е.Я.Юдин и др. М., 1985.*

УДК 534.232 (088.8)

## МЕХАНІЗМ ЗВУКОУТВОРЕННЯ В ДІАФРАГМОВОМУ ГАЗОДИНАМІЧНОМУ АКУСТИЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

© Савицький В.К., 1999

ДУ "Львівська політехніка", кафедра "Автоматизація теплових та хімічних процесів"

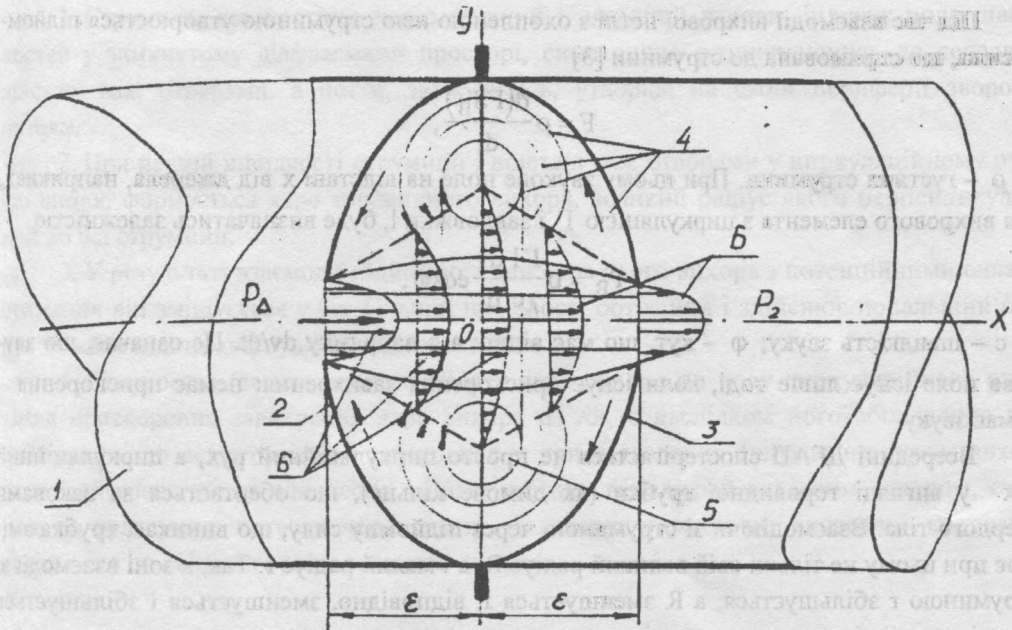
**Mechanism of forming a sound in jet acoustic converters, based on hydrodynamic effect in the this article. Herewith as a result interactions an подъемной power of kernel of curl with potential stream power appears a periodic changes mass flew on leaving transducer that is a source of pressure fluctuations of monopoly type.**

У більшості, якщо не у всіх випадках, стаціонарні періодичні коливання виникають внаслідок дії механізму зворотного зв'язку у тій чи іншій формі – гідродинамічній чи акустичній. При цьому автоколивна система повинна містити: 1) постійне джерело енергії; 2) нелінійний елемент, що регулює надходження енергії від джерела протягом періоду коливань і виконує, таким чином, роль зворотного зв'язку; 3) нагромаджувач енергії [1].

Явище звукоутворення в діафрагмових газодинамічних акустичних перетворювачах (ДГАП) зумовлене закономірностями вихроутворення при обтіканні тіл [2] і дія зворотного зв'язку може бути гідродинамічною чи акустичною. Утворення ж вихорів у стискуваному потоці одночасно супроводжується випромінюванням звуку [3], як наслідок розсіювання частини енергії турбулентного потоку. Для генерування акустичних коливань дозвуковою струминою необхідна не просто наявність незмінного вихора, а зміна прискорення його завихрення [4].

Дослідженнями [5] на плоских і просторових моделях було встановлено, що характер циркуляційних потоків і їх кількість залежить від конструктивних особливостей внутрішньої порожнини обтікання. При цьому для плоскої моделі один повномасштабний вихор утворюється тільки при квадратній формі половини області взаємодії вхідної і вихідної струмин.

У просторовій моделі, де відстань між вхідним і вихідним отворами дорівнює радіусу плоских діафрагм, вихрова система замикається сама на себе і утворює при цьому торовидний вихор, який охоплює симетричну до осі струмину.



Діафрагмовий газодинамічний акустичний перетворювач:

- 1 – трубопровід, 2 і 3 – сферичні діафрагми, 4 – лінії зворотних циркуляційних потоків,  
5 – ядро торовидного вихора, 6 – епюри розподілу швидкостей потоку

На рисунку зображена фізична модель ДГАП. Газ під дією перепаду тисків  $\Delta P = P_A - P_2$  проходить через вхідний і вихідний отвори ДГАП. В його внутрішній порожнині внаслідок раптового розширення і звуження струмини утворюється циркуляційний потік у вигляді просторового торовидного вихора. При цьому з віддаленням від початку витікання до середини відстані між отворами витрата газу зростає за рахунок бокового припливу газу, а після проходження середини відстані – симетрично зменшується до початкового значення. Швидкість завихрення згідно з Кельвіном [7] при цьому буде визначатись залежністю

$$v = \frac{\iota}{4\pi R} \left[ \frac{8r}{r} - \frac{1}{4} \right],$$

де  $R$  і  $r$  – великий і малий радіуси кільцевого вихора;  $\iota$  – інтенсивність вихора, як добуток його кутової швидкості  $\omega$  на площу перетину вихора  $S_B, \iota = \omega S_B$ . Напруженість циркуляції вихорового кільця є еквівалентною напруженості точкового диполя [6,4]

$$D = \Gamma \int d[S_B(\epsilon)] = \Gamma S_B,$$

де  $\Gamma$  – циркуляція,  $\Gamma = 4\pi r v$ ;  $S_B$  – площа перерізу вихорової петлі;  $\epsilon$  – відстань між протилежними за знаком монополями. Це означає, що поле швидкостей, яке збуджується вихоровою петлею, де вихор має постійну циркуляцію  $\Gamma$ , ідентичне полю при рівномірному розподілі диполів з напруженістю  $D$  на одиницю площі  $S_B$ .

Під час взаємодії вихрової петлі з охопленою нею струминою утворюється підйомна сила, що спрямована до струмини [3]

$$F = \rho \frac{d(\Gamma S_B)}{dt},$$

де  $\rho$  – густина струмини. При цьому звукове поле на відстані  $x$  від джерела, наприклад, для вихрового елемента з циркуляцією  $\Gamma$  і завдовжки  $l$ , буде визначатись залежністю

$$P_B = \rho \frac{\Gamma l}{\chi c} \frac{dv}{dt} \cos \varphi,$$

де  $c$  – швидкість звуку;  $\varphi$  – кут, що має відлік від напрямку  $dv/dt$ . Це означає, що звукове поле існує лише тоді, коли існує прискорення завихрення: немає прискорення – немає звуку.

Всередині ДГАП спостерігається не просто циркуляційний рух, а циркуляційний рух у вигляді торовидної трубки (як димове кільце), що обертається за законами твердого тіла. Взаємодіючи зі струминою через підйомну силу, що виникає, трубка змінює при цьому не тільки свій великий радіус  $R$ , а і малий радіус  $r$ . Так, в зоні взаємодії зі струминою  $r$  збільшується, а  $R$  зменшується і, відповідно, зменшується і збільшується при віддаленні від струмини, що рівнозначне прискоренню завихрення

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 4\pi \frac{d(vr)}{dt}$$

Оскільки розрідження від центра вихора до його периферії зменшується пропорційно квадратові сумарної циркуляції, то періодична взаємодія вихора зі струминою збудує тиск перед вихідним отвором ДГАП з тією ж частотою  $f = \omega / 2\pi R$ . Це відповідно приводить до коливань однорідності густини перед вихідним отвором згідно із залежністю

$$k = \frac{\chi}{(\chi - 1)} \frac{P}{\rho},$$

де  $k$  – коефіцієнт стискуваності;  $\chi$  – показник адиабати. Зміна густини, у свою чергу, спричинює гармонічну зміну швидкості і рівнозначно масової витрати  $G$  через вихідний отвір ДГАП, що і є характерним для акустичного джерела монопольного типу.

Якщо  $dG/dt$  є швидкість зміни масової витрати потоку, то гармонічні коливання тиску  $P_M$ , що будуть виникати у точці на відстані  $x$  від вихідного отвору ДГАП будуть визначатись залежністю

$$P_M \approx \frac{dG}{dt} \frac{1}{x} \exp(-ikx).$$

При певній швидкості струмини можливе існування і декількох вихрових кілець однакової інтенсивності, які, обертаючись в одну і ту ж сторону, утворюють при цьому об'ємні "ігри", по чергово втягуючи одне одне. Це означає, що на виході ДГАП частота коливань зростає стрибкоподібно у кратну кількість разів пропорційно до кількості кілець.

На підставі викладеного вище і поклавши в основу гідромеханічний або вихровий підхід, можна стверджувати, що механізм звукоутворення в ДГАП полягає у такому:

1. Струмина, що протікає через вхідний і вихідний отвори, індукує поле швидкостей у замкнутому діафрагмами просторі, симетрично розширюючись до середини відстані між отворами, а потім, звужуючись, утворює на своїй периферії зворотні потоки.

2. При певній швидкості струмини і відстані між отворами у циркуляційному русі, що виник, формується ядро торовидного вихора, великий радіус якого перпендикулярний до осі струмини.

3. У результаті взаємодії підйомної сили ядра цього вихора з потенційними силами струмини він зміщується у бік більшої швидкості обтікання і здійснює подальший свій рух по коловидних циркуляційних траєкторіях.

4. Синусоїдна (за час повного оберту ядра вихора по колу циркуляційного руху) зміна прискорення завихрення ядра вихора  $d\Gamma/dt$ , є наслідком його збільшення при наближенні до осі струмини і зменшення – при віддаленні. Індуковане ядром вихора поле від'ємного тиску одночасно змінює густину газу перед вихідним отвором, створюючи пульсуючу витрату через нього, і генерує гармонічні акустичні коливання аналогічно до об'ємного монопольного джерела.

1. Теория колебаний / Под ред. К.Я.Сенаторова. М., 1983. 2. Блохинцев О.И. Акустика неоднородно движущейся среды. 2-е изд. М., 1981. 206 с. 3. Powell A. Flow noise; A Perspective in Some Aspects of Flow // *Mois Control Eng.* 1977. Vol.8. N 2. P.69-80. 4. Юдин Е.Я. Исследование вихревого звука // *Отчет ЦАГИ.* 1942. 5. Батутин В.В. Основы промышленной вентиляции. М., 1956. 6. Powell A. Theory of Vortex Sound // *The Journal Acoustical Society of America.* 1964. Vol.36. N 1. P.177-195. 7. Anderson A.B.C. Vortex-Ring Structure-transition in a Jet Exiting Discrete Acoustic Frequencies // *The Journ. of the Acoust. Soc. of America.* 1956. Vol.28. N 5. P.914-921.